

УДК 621.373

**А.А. Колегов¹, Е.Г. Акулинин¹, Е.А. Белов¹,
А.В. Загидулин¹, Д.В. Кулаков¹, А.В. Галеев¹,
Н.В. Буров², В.Б. Ромашова², И.А. Цибизов²,
А.А. Акимов², Д.С. Свяжина²**

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

²Акционерное общество «ЛЛС», Санкт-Петербург, Россия

**ОДНОМОДОВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ВЫСОКИМ
КАЧЕСТВОМ ПУЧКА И МОЩНОСТЬЮ 1 КВТ –
СОВМЕСТНАЯ РАЗРАБОТКА АО «ЛЛС» И ФГУП
«РФЯЦ-ВНИИТФ ИМ. АКАДЕМИКА Е.И. ЗАБАБАХИНА»**

Статья посвящена разработке волоконного лазера с высоким качеством излучения, имеющего большое количество способов практического применения. В статье приведены результаты исследований качества пучка, спектра излучения и параметров лазера в импульсном режиме работы.

Ключевые слова: волоконный лазер, высокая мощность, аддитивные технологии, квази-одномодовый режим, одномодовый режим.

**A.A. Kolegov¹, E.G. Akulinin¹, E.A. Belov¹, A.V. Zagidulin¹,
D.V. Kulakov¹, A.V. Galeev¹, N.V. Burov², V.B. Romashova²,
I.A. Tsibizov², A.A. Akimov², D.S. Svyazina²**

¹FSUE RFNC-VNIITF im. acad. E.I. Zababakhina", Snezhinsk, Russian Federation

²Joint Stock Company "LLS", Saint Petersburg, Russian Federation

**SINGLE MODE FIBER LASER WITH HIGH
BEAM QUALITY AND POWER 1 KW – JOINT
DEVELOPMENT OF JSC "LLS"
AND FSUE RFNC-VNIITF IM. ACADEMIC
E.I. ZABABAKHIN"**

The article is devoted to the development of a fiber laser with high radiation quality, which has a large number of practical applications. The article presents the results of studies of the quality of the beam, the radiation spectrum and parameters of the laser in a pulsed mode of operation.

Keywords: fiber laser, high power, additive technologies, quasi-singlemode, singlemode, SC "LLC", FSUE "RFNC-VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin".

Введение

Рынок высокомошных лазеров постоянно растет, спрос на них повышается, чему способствует появление новых оптических схем, активных волокон, что позволяет расширить диапазон длин волн генерации, увеличить выходную мощность, сохранить качество пучка и повысить КПД [1]. Волоконные лазеры высокой мощности представляют основную часть отечественных установок для применения в промышленности.

Специалисты АО «ЛЛС» совместно с ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина» приняли решение о разработке одномодового волоконного лазера с высоким качеством пучка и мощностью 1 кВт.

Задача сформировалась из трех основных пунктов:

- развитие отечественных лазерно-оптических технологий в России;
- укрепление политики импортозамещения в стране;
- разработка и реализация волоконного лазера, который не будет уступать по характеристикам аналогам мировых производителей.

Этапы работы

Для создания продукта был проведен анализ конкурентов, рынка сбыта и перспективы развития данного проекта.

Специалистами «РФЯЦ-ВНИИТФ» были разработаны оптическая и электрическая схемы источника лазерного излучения, определены требуемые характеристики компонентов, которые могли бы обеспечить высокую мощность в сочетании с высоким качеством пучка и надежностью.

Для обеспечения высокой надежности, стабильности и требуемых выходных параметров излучения лазера на этапе подбора компонентов инженерами АО «ЛЛС» был сделан выбор в пользу производителей, подтверждающих качество выпускаемых пассивных волоконно-оптических компонентов стандартизированными (регламентированными) тестами. Это вместе с осуществляемым входным контролем на предпроизводственном этапе позволило добиться необходимых характеристик лазера.

В конечном итоге был создан источник излучения, не уступающий по техническим параметрам имеющимся мировым аналогам.



Рис. 1. Одномодовый волоконный лазер LLS-YFLSM-1000

Впервые новый источник излучения был представлен в рамках Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2019), которая проходила в Перми с 8 по 11 октября 2019 г.

Ключевые характеристики

На данный момент в линейке представлена модель серии LLS-YFLSM-1000 (рис. 1, таблица), являющаяся наиболее востребованной на рынке. Это модель с уровнем мощности 1 кВт. Источник излучения может работать как в непрерывном режиме, так и с возможностью модуляции с частотой не менее 5 кГц. Мощность излучения 1 кВт достигается в резонаторе без усилительных каскадов, а используемое волокно позволяет достичь высокого уровня качества выходного излучения.

Технические характеристики лазера LLS-YFLSM-1000

Параметр	Значение
Длина волны генерируемого лазерного излучения	1070–1090 нм (в зависимости от ВБР)
Оптическая мощность генерируемого лазерного излучения	1000 Вт
Диапазон регулировки мощности	10–100 %, с шагом 1
Мода излучения	Одномодовый, TEM ₀₀
Качество пучка, M ²	1,1–1,2
Фронт нарастания/спада оптической мощности (от 0 до 100 %, от 100 до 0 %)	<100 мкс
Тип оптического разъема	QВН с водяным охлаждением
Режимы генерации	Непрерывный, с возможностью модуляции

Максимальная частота модуляции	Не менее 5 кГц
Питание	220 В, 50 Гц
Максимальная потребляемая электрическая мощность	3500 Вт
Масса	40 кг
Габариты (Ш × Г × В)	483 × 770 × 140 мм (3U 19" Rack)
Длина волны пилотного лазера	630–660 нм
Мощность излучения пилотного лазера	1 мВт

Разработанный источник излучения обладает следующими параметрами, не уступающими зарубежным аналогам: возможность перестройки мощности, возможность выбора длины волны в диапазоне от 1070–1090 нм. При этом он обладает малым весом – 40 кг. LLS-YFLSM-1000 имеет QВН-разъем и программное управление, что обеспечивает легкую интеграцию в большинство промышленных установок.

Тестирование основных параметров волоконного лазера LLS-YFLSM-1000

- Тестирование оптической эффективности

Контроль мощности лазерного излучения производится по ГОСТ Р ИСО 11554-2008 при помощи измерителя мощности Ophir серии L1500W-BB-50 прямыми измерениями. Согласно испытаниям получено 74 % квантовой эффективности, что является достаточно высоким показателем в сравнении с коммерчески доступными системами (рис. 2).

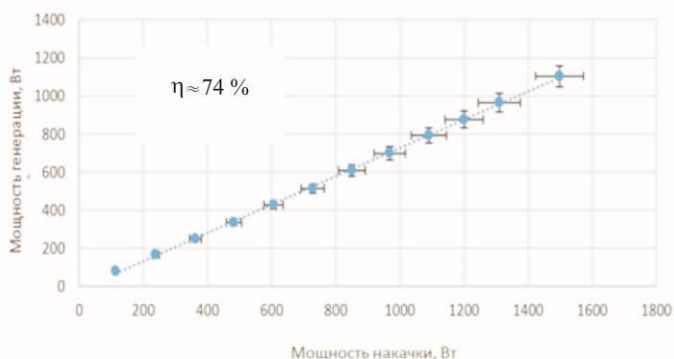


Рис. 2. Дифференциальный КПД

• Тестирование спектра выходного излучения

По результатам тестирования спектра выходного излучения, представленного на рис. 3, ширина спектра составила $\Delta\lambda = 0,5$ нм по уровню FWHM.

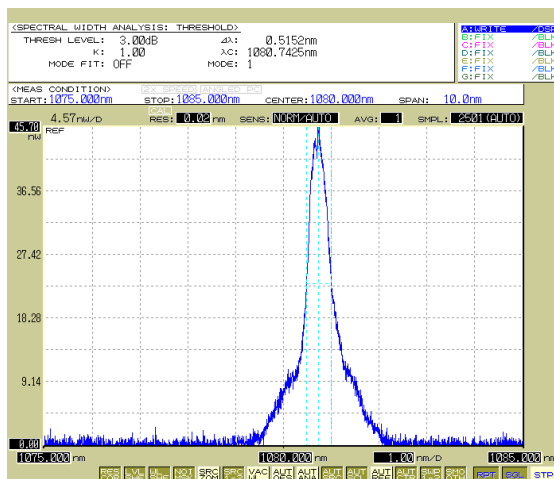


Рис. 3. Спектр выходного излучения лазера

• Измерение параметра M^2

Измерение коэффициента распространения производится по ГОСТ Р ИСО 11146-1-2008. Диаметр лазерного пучка измеряется методом ножа Фуко по ГОСТ Р ИСО 11146-3-2008. Профиль пучка определяется с помощью профилометра Ophir серии BeamWatch.

Основной параметр, на который делается акцент, – это качество пучка M^2 , составляющее 1,1 – 1,15. Параметр M^2 на сегодня является наиболее популярным для представления качества излучения и определяется как деление параметра ВВР (beamparameterproduct) на дифракционный предел λ/π . Это позволяет не только охарактеризовать качество выходного пучка, но и описать изменение радиуса пучка вдоль луча [2]:

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_c}, \tag{1}$$

$$BPP = R \times \alpha, \tag{2}$$

где R – радиус перетяжки пучка, α – половина угла расходимости (рис. 4).

$$BPP_0 = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (3)$$

где λ – длина волны генерируемого излучения.

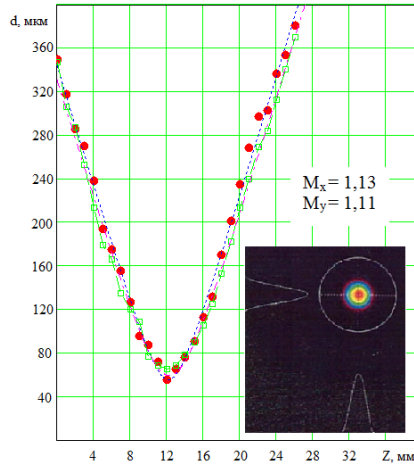


Рис. 4. Зона перетяжки

• **Тестирование параметров импульсного излучения**

Испытания проводились согласно ГОСТ Р ИСО 11554-2008. Измерения проводились при помощи фотоприемника ФД-256 и осциллографа TekTronix серии TDS3000 с полосой пропускания 500 МГц.

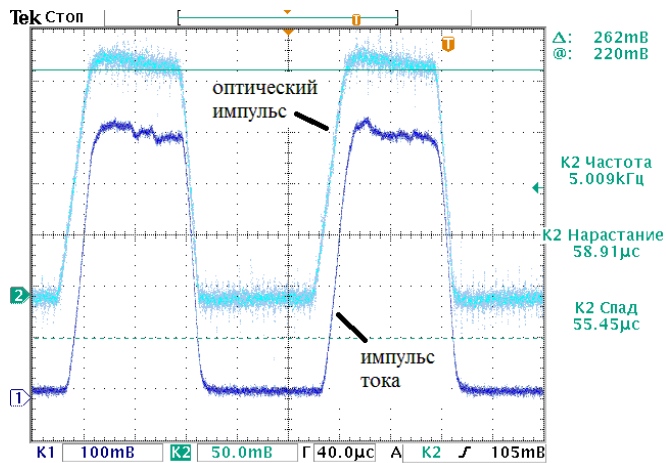


Рис. 5. Результат работы волоконного лазера в импульсном режиме

Тут стоит отметить, что в случае работы в режиме модуляции можно наблюдать крутые фронты импульса, что позволяет использовать источник излучения в аддитивных технологиях, требующих быстрого воздействия на материал (рис. 5).

Применение

LLS-YFLSM-1000 может применяться в аддитивных технологиях, резке высокоотражающих материалов, передаче направленной энергии и научных проектах, где используется излучение высокой мощности.

Заключение

В настоящий момент АО «ЛЛС» планирует наращивать экспорт и развивать новые направления в разработке источников излучения. Более того, совместно с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» идет подготовка к серийному производству волоконных лазеров серии LLS-YFLSM с расширением линейки по мощности до 1500 Вт.

Главными преимуществами созданного источника излучения являются полностью российские разработка и сборка, проверенные производители комплектующих, высокое качество излучения, а также промышленный дизайн, совместимый со стандартными установками.

Сегодня совершена поставка лазера LLS-YFLSM-1000 во Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений в качестве мощного источника излучения.

С целью увеличения качества обслуживания клиентов АО «ЛЛС» в скором времени планируются открытие и формирование собственного сервисного центра для гарантийного и постгарантийного обслуживания поставляемых лазеров, что позволит максимально быстро восстанавливать работоспособность устройств в случае поломки.

Список литературы

1. Мировой лазерный рынок в 2018 и прогноз на 2019 / Г. Овертон, А. Ноджи, Д. Бельфорте, Б. Геверт // ЛазерИнформ. – 2019. – № 5 (644). – С. 1–8.
2. Потёмкин А.К., Хазанов Е.А. // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 11. – С. 1042–1044.

References

1. Overton Gail, Nogee Allen, Belforte David, Wallace John, Gefvert Barbara. Whatgoesup ... Annual laser market review & forecast 2019. *Laser Focus World*. January 2019, pp. 40-45, 47, 49-54, 56-58, 60-61, 64-65. Perevod: Overton G., Nodzhi A., Bel'forte D., Gevert B. Mirovoi lazernyi rynok v 2018-m i prognoz na 2019-i [World laser market in 2018 and forecast for 2019]. *Lazer Inform*, 2019, no. 5(644), pp. 1-8.

2. Potemkin A.K., Khazanov E.A. Calculation of the laser-beam M^2 factor by the method of moments. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 11, pp. 1042-1044.

Получено 25 июня 2020